

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

В. Р. Телеснин

Описан метод использования матриц из ферритовых сердечников, обычно применяемых в запоминающих устройствах, для переработки информации. Устройство, в котором использован указанный метод, позволяет реализовать (поразрядно) логические функции, а также арифметические действия (сложение, вычитание и умножение). В то же время число активных элементов почти не возрастает по сравнению с матрицей, предназначенной только для хранения информации.

1. В современных вычислительных машинах для хранения информации часто применяются запоминающие устройства на магнитных элементах — ферритовых сердечниках, имеющих два устойчивых состояния, отличающихся знаком остаточной индукции. Одному из устойчивых состояний соответствует код 0, другому — код 1. Основной частью запоминающего устройства является магнитная матрица, обычно представляющая собой сетку горизонтальных и вертикальных шин, в узлах которой находятся ферритовые сердечники (см., например, [1]). Для перемагничивания ферритового сердечника необходимо создать в нем магнитное поле с напряженностью H_0 , превосходящей значение H_s (поля старта) [2]. Напряженность поля определяется размерами сердечника и величиной тока, протекающего через шину матрицы. Амплитуда импульса тока, подаваемого на шину матрицы, выбирается такой, что напряженность поля в сердечнике имеет величину $H_0/2 < H_s$. Перемагничивание сердечника a_{ij} происходит в том случае, если на горизонтальную шину X_i и вертикальную шину Y_j поданы одновременно импульсы тока соответствующей полярности с амплитудой $J_0/2$ (ток J_0 соответствует напряженности поля в сердечнике, равной H_0). Для определенности будем считать, что если подаваемые импульсы имеют положительную полярность, то в сердечник записывается код 1, если отрицательную, то код 0.

Кроме магнитных матриц запоминающие устройства содержат известное количество активных элементов — формирователей импульсов, усилителей и т. д.

Логические и арифметические устройства часто также реализуются с применением ферритовых сердечников, причем каждый элемент содержит, кроме ферритовых сердечников, ряд вспомогательных элементов — диодов или транзисторов (см., например, [3]). Использование таких схем для хранения информации невыгодно из-за большого количества оборудования на единицу информации.

В настоящей работе рассматривается построение устройств, предназначенных как для хранения, так и для переработки информации. Основой такого устройства является двумерная магнитная матрица, показанная на рис. 1. Матрица, макет которой испытывался, содержит 18 строк и 16 столбцов. Строкой (столбцом) будем называть горизонтальную (вертикальную) шину с находящимися на ней сердечниками. Каждая строка соответствует числу, а столбец — одному разряду всех чисел. 16 строк собраны на тороидах размером $3 \times 2 \times 1,5$ мм из феррита марки К-28. Для этих сердечников $J_0 = 1a$. Кроме того, имеются

две специальные строки Ξ_1 и Ξ_2 , собранные на тороидах размером $1 \times 0,5 \times 0,5$ мм из феррита К-272; для этих сердечников ток $i_0 = 200$ ма.

Запись кода 0 во всех сердечниках некоторой строки (стирание строки) может быть достигнута подачей отрицательных импульсов на все вертикальные и выбранную горизонтальную шины. Однако более

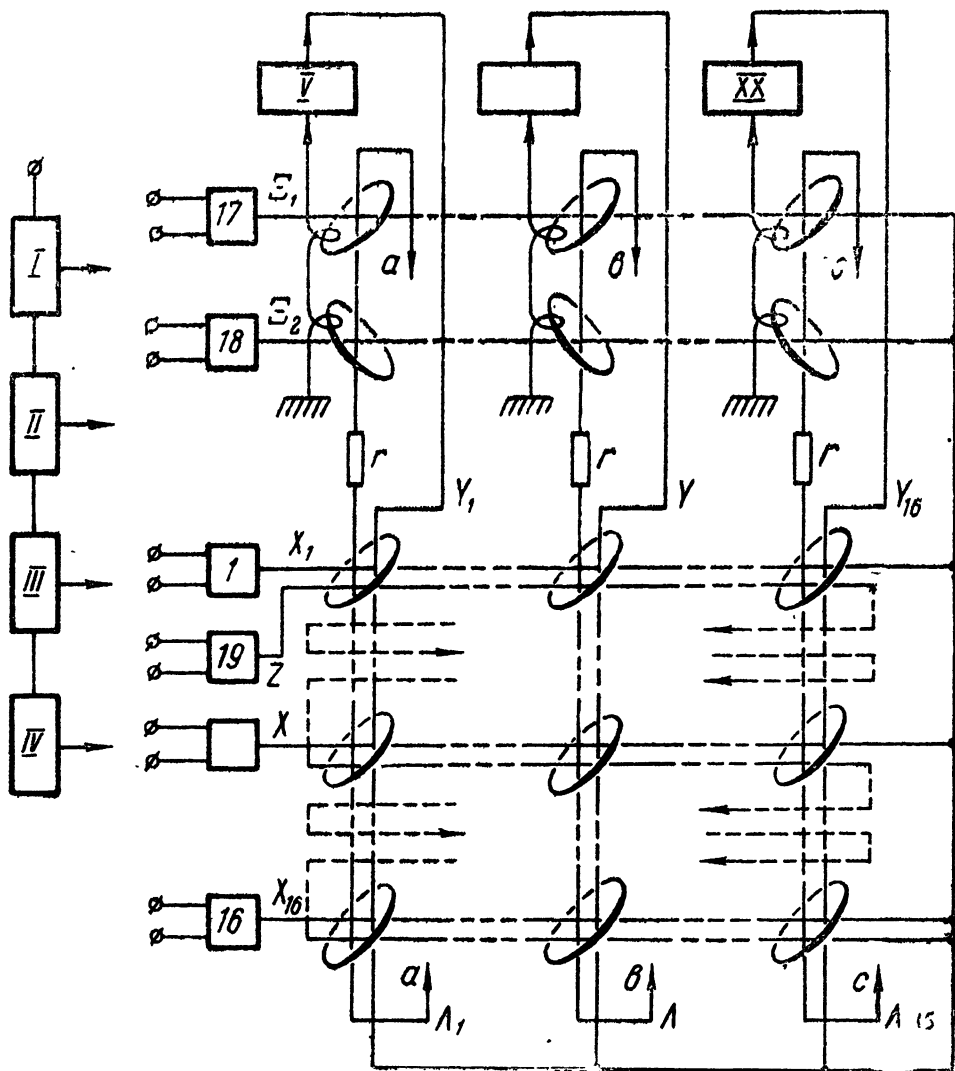


Рис. 1.

удобным является введение шины Z , проходящей через все сердечники матрицы, за исключением специальных строк. С введением этой обмотки отпадает необходимость подачи отрицательных импульсов на вертикальные шины; при этом уменьшается количество вспомогательного оборудования.

На горизонтальные шины специальных строк Ξ_1 и Ξ_2 могут подаваться отрицательные импульсы тока с амплитудой, превышающей i_0 ; кроме того, на горизонтальную шину строки Ξ_1 может быть подан положительный импульс с амплитудой $i_0/2$, на горизонтальную шину

строки Ξ_2 — положительный импульс с амплитудой i_0 . Длительность импульсов — $1,5 \div 2$ мксек.

Таким образом, матрица содержит m горизонтальных шин $X_1 \dots X_m$, n вертикальных шин $Y_1 \dots Y_n$, общую шину Z ; специальные строки содержат шины Ξ_1, Ξ_2 .

Свяжем наличие импульсов на этих шинах с величинами $x_i^\pm, y_j^\pm, z^-, \xi_1^\pm, \xi_2^\pm$, принимающими значение 0 либо 1 (так, как это показано в таблице 1).

Таблица 1

	x_i^+		x_i^-		y_j^+		z^-		ξ_1^+		ξ_1^-		ξ_2^+		ξ_2^-	
	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Ток, протекающий в шине	0	$\frac{J_0}{2}$	0	$-\frac{J_0}{2}$	0	$\frac{J_0}{2}$	0	$-\frac{J_0}{2}$	0	$\frac{i_0}{2}$	0	$-\frac{i_0}{2}$	0	i_0	0	$-i_0$

При описании работы матрицы мы будем считать, что время принимает лишь целочисленные значения. Время перемагничивания сердечника учитывать не будем. Состояние сердечника в момент t обозначим буквой b_j . Равенство $b_t = 1$ ($b_t = 0$) означает, что в сердечник записан код 1 (код 0).

Так как амплитуды подаваемых на шины импульсов фиксированы, то напряженность поля в j -ом сердечнике строки X_i определяется набором $(x_i^+, y_j^+, x_i^-, z^-)$. Сердечник перейдет из состояния 0 в состояние 1 при наборе (1, 1, 0, 0); обратный переход произойдет при наборе (0, 0, 1, 1). Остальные наборы не изменяют состояния сердечника. Эту зависимость можно выразить следующим уравнением алгебры логики:

$$(b_{ij})_{t+1} = (x_i^+ y_j^+ \bar{z}^-)_{t+1} (\bar{b}_{ij})_t \vee (\bar{x}_i^- \vee \bar{z}^- \vee y_j^+)_{t+1} (b_{ij})_t, \quad (1)$$

где знак „ \vee “ (или) означает дизъюнкцию (логическое сложение), знак „ $\bar{}$ “ — инверсию (логическое отрицание). Заметим, что $(x_i^+ x_i^-)_\tau = 0$ в любой момент времени τ , т. е. на одну шину не могут одновременно подаваться импульсы обеих полярностей.

Для осуществления операций над двоичными числами с помощью матрицы необходимо иметь возможность переписывать информацию из одной строки в другую. Для этого служат обмотки перезаписи Λ_j (рис. 1). При перемагничивании любого сердечника j -го столбца в обмотке Λ_j возникает импульс тока. Сопротивление r в цепи обмотки перезаписи выбрано таким, что амплитуда этого импульса превышает i_0 .

Свяжем с наличием либо отсутствием импульсов тока определенной полярности в обмотках перезаписи величины $(\lambda_j^-)_t$, принимающие значение 1, если в обмотке перезаписи j -го столбца в момент t протекает импульс тока соответствующей полярности, и значение 0, если импульс отсутствует.

Положительный импульс возникает при записи кода 0 в сердечник, хранивший единицу; отрицательный импульс возникает при записи кода 1 в сердечник, хранивший нуль. Это можно записать в виде равенств:

$$(\lambda_j^+)_{t+1} = (z^- y_j^+)_{t+1} \left[\bigvee_{i=1}^m (x_i^-)_{t+1} (b_{ij})_t \right]; \quad (2)$$

$$(\lambda_j^-)_{t+1} = (y_j^- z^-)_{t-1} \left[\prod_{i=1}^m (x_i^-)_{t-1} (\bar{b}_{ij})_t \right]. \quad (3)$$

Обмотки перезаписи Λ_j являются вертикальными шинами специальных строк. Эти обмотки пронизывают сердечники специальных строк в разных направлениях, так что положительный импульс в обмотке Λ_j записывает в сердечник строки Ξ_1 код 1, а в сердечник строки Ξ_2 код 0.

Напишем уравнения состояния β_{1j} , β_{2j} сердечников специальных строк:

$$(\beta_{1j})_{t+1} = (\lambda_j^- \bar{\xi}_1^-)_{t+1} (\bar{\beta}_{1j})_t \overline{V (\lambda_j^- \bar{\xi}_1^- V \bar{\xi}_1^- \lambda_j^+)_{t+1}} (\beta_{1j})_t; \quad (4)$$

$$(\beta_{2j})_{t+1} = (\lambda_j^- \bar{\xi}_2^- V \bar{\xi}_2^- \lambda_j^+)_{t+1} (\bar{\beta}_{2j})_t \overline{V (\lambda_j^- \bar{\xi}_2^- V \bar{\xi}_2^- \lambda_j^+)_{t+1}} (\beta_{2j})_t. \quad (5)$$

Если в некоторый момент t во всех сердечниках специальных строк записан код 0 ($\beta_{1j} = \beta_{2j} = 0$; $j = 1, \dots, n$), а в i -ой строке матрицы записана информация b_{ij} ($j = 1, \dots, n$), то при стирании в момент $t + 1$ этой строки матрицы и подаче положительного импульса на горизонтальную шину строки Ξ_2 информация переписывается из строки X_i в строку Ξ_1 прямым, а в строку Ξ_2 обратным кодом. В самом деле, из написанных выше уравнений следует:

$$(\lambda_j^+)_{t-1} = (b_{ij})_t; \quad (\beta_{1j})_{t-1} = (\lambda_j^+)_{t+1} = (b_{ij})_t;$$

$$(\lambda_j^-)_{t-1} = 0; \quad (\beta_{2j})_{t-1} = (\lambda_j^-)_{t+1} = (\bar{b}_{ij})_t.$$

Производя последовательно запись информации из двух различных строк в специальные строки, можно осуществить поразрядную дизъюнкцию ($b_1 \vee b_2$) чисел, хранящихся в разных строках матрицы, и операцию Шеффера ($\bar{b}_1 \vee \bar{b}_2$). Используя эти операции, можно реализовать любые логические функции переменных, хранящихся в одном столбце, но для этого необходимо запоминать промежуточные результаты, т. е. переписывать информацию из строк Ξ_1 и Ξ_2 в строки $X_1 \dots X_m$.

Для этого сердечники специальных строк имеют выходные обмотки. При стирании одной из специальных строк в выходных обмотках сердечников, хранивших единицы, возбуждаются отрицательные импульсы с амплитудой 1,5 в. Эти импульсы подаются на входы формирователей импульсов вертикалей. Если в j -ом сердечнике специальной строки был записан код 1, то при стирании этой строки на шину Y_j подается импульс тока с амплитудой $J_0/2$:

$$(y_j)_{t-1} = (\xi_1)_{t-1} (\beta_{1j})_t \vee (\xi_2)_{t+1} (\beta_{2j})_t. \quad (6)$$

Если одновременно со стиранием специальной строки подать импульс тока на горизонтальную шину X_i , то информация из специальной строки будет переписана в строку X_i .

2. Макет матрицы испытывался на установке, показанной на рис. 1, где I—IV — цепочка ждущих мультивибраторов, дающих на выходе положительные импульсы длительностью 2 мксек (тактовые импульсы), 1—19 — формирователи импульсов горизонталей, имеющие 2 входа; при подаче тактового импульса на первый вход на выходе получается положительный импульс, при подаче тактового импульса на второй вход — отрицательный, V—XX — формирователи импульсов вертикалей, представляющие собой ждущие мультивибраторы с порогом срабатывания 1—1,3 в (рис. 2).

Программы различных операций реализуются подключением в соответствующем порядке выходов тактовых мультивибраторов к входам формирующих каскадов. Наличие четырех тактовых мультивибраторов оказывается достаточным для осуществления элементарных операций. Для сложных последовательностей операций необходимо переключать входы формирователей во время хода операции.

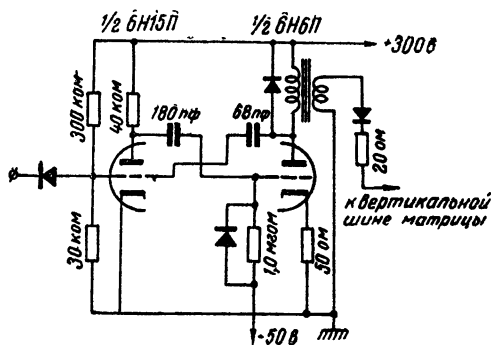


Рис. 2.

ние (по mod 2) и поразрядное умножение со сдвигом на 1 разряд влево:

$$a_k^{(1)} = a_k \bar{b}_k \vee \bar{a}_k b_k \quad (k = 1, \dots, n);$$

$$b_k^{(1)} = a_{k-1} b_{k-1} \quad (k = 1, \dots, n+1).$$

С числами $a_n^{(1)}, \dots, a_1^{(1)}$; $b_{n+1}^{(1)}, \dots, b_2^{(1)}$; 0 производятся те же действия. Процесс повторяется до тех пор, пока число $b_{n+1}^{(q)}, \dots, b_1^{(q)}$ не обратится в нуль. При этом число $a_{n+1}^{(q)}, \dots, a_1^{(q)}$ является искомой суммой.

Добавив к матрице строку, осуществляющую сдвиг на 1 разряд влево, можно производить сложение двоичных чисел описанным выше способом. Поразрядное умножение с помощью матрицы можно производить, пользуясь формулой $ab = \overline{(a \vee \bar{b})}$, поразрядное сложение (по mod 2) — пользуясь формулой $\bar{a}\bar{b} \vee \bar{a}b = (a \vee b) \overline{(a \vee \bar{b})}$, но при этом сумматор будет работать очень медленно.

Можно производить поразрядное сложение (по mod 2) и поразрядное умножение всего в два такта, добавив к матрице две дополнительные строки (рис. 3).

Строки U_1 и U_2 (рис. 3) — обычные строки матрицы, но сердечники строки U_2 пронизаны обмотками перезаписи в обратном направлении. Кроме того, в каждом разряде, за исключением старшего, имеется еще одна обмотка Σ (обмотка переносов), проходящая через сердечники строк U_1 и U_2 и сердечник следующего разряда строки E_3 — строки переносов. Сопротивления R в цепи обмоток E выбраны такими, что амплитуда импульсов, возникающих в них при перемагничивании сердечника строки U_1 или U_2 , равна $i_0/2$. Очевидно, при одновременном перемагничивании сердечников j -го разряда строк U_1 и U_2 в обмотке Σ_j возникает импульс тока с амплитудой i_0 , а в обмотке Λ_j импульс не возникает.

Условия возбуждения импульсов в обмотках Λ_j отличаются от уравнений (2), (3):

$$(\lambda_j^+)_{t+1} = (z - u_1^- y_j^+)_{t+1} \overline{[(u_2^-)_{t+1} (b_{2j})_t]} \times$$

$$\begin{aligned} & \times (b_{1j})_t V (u_2^+ y_j^+ z^-)_{t+1} \overline{[(u_1^+)_{t+1} (\bar{b}_{1j})_t]} (\bar{b}_{1j})_t ; \\ & (\lambda_j^-)_{t+1} = (z^- u_2^- y_j^-)_{t+1} \overline{[(u_1^-)_{t+1} (\bar{b}_{1j})_t]} \times \\ & \times (b_{2j})_t V (u_1^+ y_j^+ z^-)_{t+1} \overline{[(u_2^+)_{t+1} (\bar{b}_{2j})_t]} (\bar{b}_{1j})_t. \end{aligned} \quad (7)$$

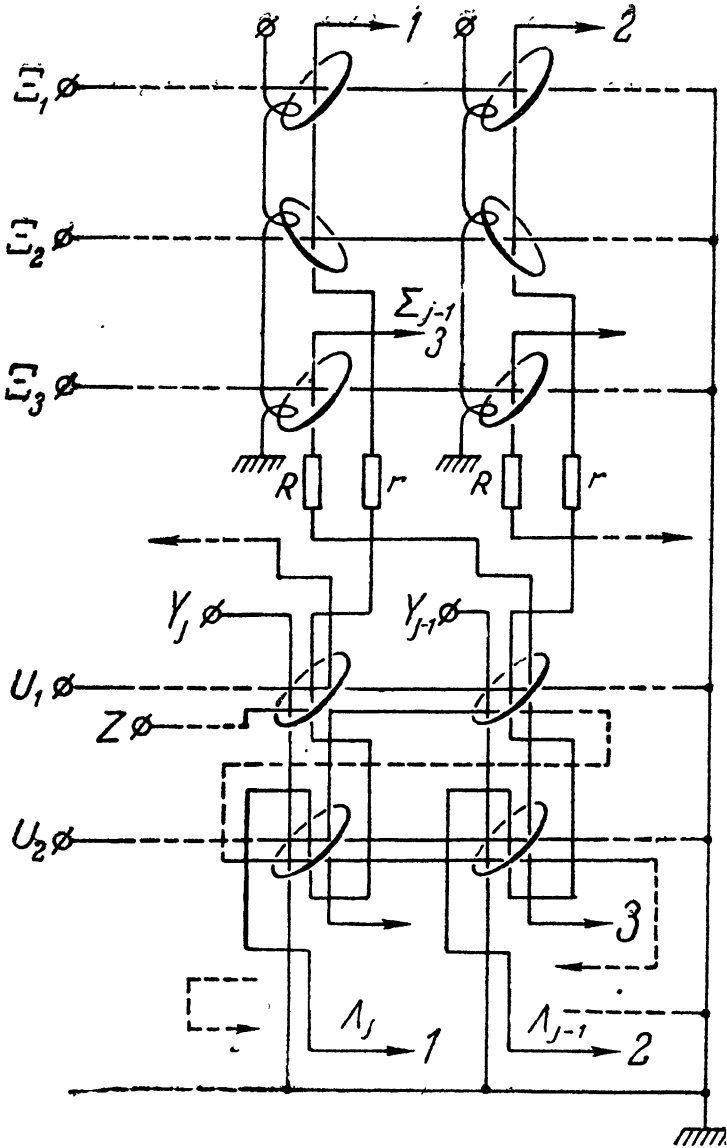


Рис. 3.

Согласно (7), положительный импульс возникает при записи кода 0 в сердечник строки U_1 , хранивший единицу, если одновременно не производится запись кода 0 в сердечник того же разряда строки U_2 , хранивший единицу; соответственно положительный импульс возникает при записи кода 1 только в сердечник строки U_2 , хранивший нуль. Отрицательный импульс в обмотке Λ_j возникает при записи кода 0 только в сердечник строки U_2 , хранивший единицу, или при записи кода 1 только в сердечник строки U_1 , хранивший нуль.

На горизонтальную шину строки переносов могут подаваться отрицательные импульсы тока с амплитудой, значительно превышающей i_0 .

Напишем уравнение состояния сердечника строки переносов:

$$(\beta_{3j})_{t+1} = (z^- u_1^- u_2^- \bar{y}_{j-1}^+ \bar{\xi}_3^-)_{t-1} (b_{1, j-1} b_{2, j-1})_t (\beta_{3j})_t V (\bar{\xi}_3^-)_{t-1} (\beta_{3j})_t.$$

Уравнения состояния сердечников строк Ξ_1 и Ξ_2 были написаны выше (см. (4), (5)).

При одновременном стирании строк U_1 и U_2

$$(u_1^-)_{t+1} = (u_2^-)_{t+1} = (z^-)_{t+1} = 1; \quad (y_j^+)_{t+1} = (\xi_i^-)_{t+1} = 0$$

и

$$(\beta_{1j})_t = (\beta_{2j})_t = (\beta_{3j})_t = 0 \quad (j = 1, \dots, n; \quad i = 1, 2, 3);$$

$$(\beta_{3j})_{t+1} = (b_{1, j-1} b_{2, j-1})_t;$$

$$(\lambda_j^+)_{t+1} = (b_{1j} \bar{b}_{2j})_t; \quad (\lambda_j^-)_{t+1} = (\bar{b}_{1j} b_{2j})_t;$$

$$(\beta_{1j})_{t-1} = (b_{1j} \bar{b}_{2j})_t; \quad (\beta_{2j})_{t+1} = (\bar{b}_{1j} b_{2j})_t.$$

Выходные обмотки сердечников строк Ξ_1 , Ξ_2 , Ξ_3 подключены к входам формирующих каскадов вертикалей. Аналогично (6) имеем:

$$(y_j^+)_{t+1} = (\xi_1^-)_{t+1} (\beta_{1j})_t V (\xi_2^-)_{t+1} (\beta_{2j})_t V (\xi_3^-)_{t+1} (\beta_{3j})_t.$$

Рассмотрим теперь работу всего сумматора. Слагаемые записываются в строки U_1 и U_2 . Операция сложения разделяется на несколько циклов, по 4 такта в каждом цикле. В первом такте стираются обе строки U_1 , U_2 . При этом

$$(\beta_{1j})_{t+1} = (b_{1j} \bar{b}_{2j})_t; \quad (\beta_{2j})_{t+1} = (\bar{b}_{1j} b_{2j})_t;$$

$$(\beta_{3j})_{t+1} = (b_{1, j-1} b_{2, j-1})_t; \quad (b_{1j})_{t+1} = (b_{2j})_{t+1} = 0.$$

Во втором такте стираются строки Ξ_1 , Ξ_2 и подается положительный импульс с амплитудой $J_0/2$ на шину строки U_1 :

$$(y_j^+)_{t+2} = (\beta_{1j})_{t+1} V (\beta_{2j})_{t+1} = (b_{1j} \bar{b}_{2j} V \bar{b}_{1j} b_{2j})_t;$$

$$(b_{1j})_{t+2} = (b_{1j} \bar{b}_{2j} V \bar{b}_{1j} b_{2j})_t.$$

В третьем такте никаких операций не производится; он нужен для того, чтобы установился порог срабатывания ждущих мультивибраторов, которые формируют импульсы вертикалей [4]. В четвертом такте стирается строка переносов Ξ_3 , подается положительный импульс на горизонтальную шину строки U_2 и отрицательный импульс на шину строки Ξ_1 для предотвращения записи информации в эту строку при перемагничивании сердечников строки U_2 :

$$(y_j^+)_{t+4} = (\beta_{3j})_{t+3} = (\beta_{3j})_{t-1} = (b_{1, j-1} b_{2, j-1})_t;$$

$$(b_{2j})_{t+4} = (b_{1, j-1} b_{2, j-1})_t.$$

Таким образом, в первом цикле произведено поразрядное сложение (по mod 2) исходных слагаемых и результат записан в строку U_1 , а также поразрядное умножение со сдвигом на 1 разряд влево и результат записан в строку U_2 . С полученными таким образом числами в следующем цикле производятся те же действия. После окончания сложения (когда во всех разрядах строк U_2 и Ξ_3 будут записаны нули) полученная сумма будет в каждом цикле переписываться из строки U_1 в строку Ξ_1 и обратно.

Нетрудно сделать схему, которая прекращает работу сумматора по окончании сложения (см. рис. 4). В самом деле, при отсутствии переносов ждущий мультивибратор на рис. 4 не запускается, работа сумматора прекращается; сумма остается в строке U_1 .

С помощью такого сумматора можно производить не только сложение, но и вычитание двоичных чисел. Напомним, что перевод числа в обратный код производится без труда с помощью строки E_2 .

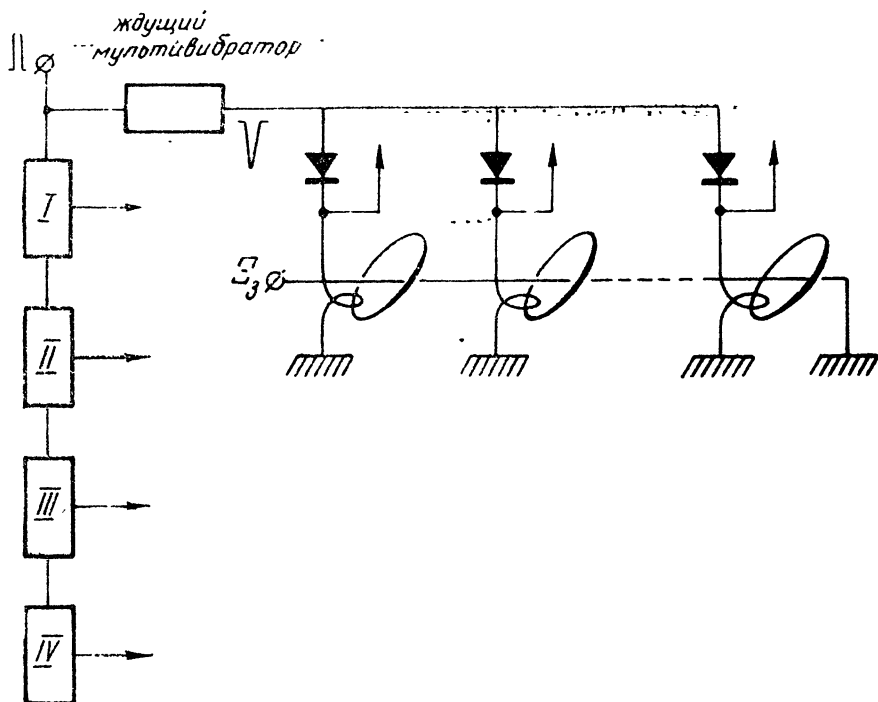


Рис 4

Для умножения к матрице добавляются еще две строки — m_1 и m_2 , при записи числа из которых в обычные строки матрицы осуществляется сдвиг на 1 разряд соответственно влево и вправо. Множимое и множитель записаны в строки M_1 и M_2 — обычные строки матрицы. Умножение так же, как и сложение, разбивается на ряд одинаковых циклов. В первом цикле множитель переписывается в строку m_2 , а затем обратно в строку M_2 со сдвигом на 1 разряд вправо. При этом, если код сердечника младшего разряда был единица, то запускаются формирователи, обеспечивающие запись множимого в строку U_2 сумматора, и производится суммирование с накоплением суммы в строке U_1 . Независимо от кода сердечника младшего разряда множителя множимое переписывается в строку m_1 и затем обратно в строку M_1 со сдвигом на 1 разряд влево. Таким образом, к началу следующего цикла множимое и множитель записаны опять в строки M_1 и M_2 , но множимое сдвинуто на 1 разряд влево, а множитель — на 1 разряд вправо.

Заметим, что один такт работы описанного устройства занимает время порядка $1,5 \div 2$ мксек. Поэтому, несмотря на то, что операции сложения и умножения осуществляются за большое число тактов, устройство может найти применение в цифровых вычислительных машинах среднего класса, особенно в вычислительных перфораторах

Считаю своим приятным долгом выразить благодарность А. Г. Ви

тушкину и М. Л. Цетлину за ряд важных указаний при выполнении работы, а также В. И. Шестакову за ценные замечания, сделанные при обсуждении результатов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. М. П. Сычева, А. С. Федоров, Запоминающее устройство на ферритах в машине БЭСМ, изд. ИТМ АН СССР, М., 1957.
2. К. М. Поливанов, Ферромагнетики, Госэнергоиздат, М., 1957.
3. М. Л. Цетлин, Л. М. Шехтман, Проблемы кибернетики, вып. 2, 139, 1959.
4. А. Ф. Иванов, В. Р. Телесний, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 2, 125 (1959).

Московский государственный университет

Поступила в редакцию
26 апреля 1959 г.